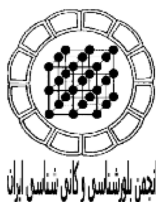
مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران

مقاله پژوهشی

سال بیست و هشتم، شمارهٔ دوم، تابستان ۹۹، از صفحهٔ ۳۸۳ تا ۴۰۰



زمین شیمی عناصر خاکی نادر کانی‌های گروه گارنتِ برخی از مجموعه‌های دگرگونی ناحیه‌ای-خرد قاره ایران مرکزی

غلامرضا تاج بخش*، سید محمدعلی موسوی زاده

گروه زمین شناسی، پردیس علوم، دانشگاه یزد، یزد، ایران

(دریافت مقاله: ۹۸/۴/۱۸، نسخه نهایی: ۹۸/۷/۱۴)

چکیده: مقدار و چگونگی تمرکز عناصر کمیاب و خاکی نادربلورهای گارنت وابسته به دگرگونی ناحیه‌ای مناطق ده‌سلم، زمان‌آباد، میشدوان و تنبور در خرد قاره ایران مرکزی بررسی شد. این بلورها بیشتر از میکاشیست‌های مربوط به رخساره‌های شیست سبز تا آمفیبولیت جدا شده‌اند. ترکیب کانی شناسی گارنت‌ها، آلماندین‌های غنی از منگنز و منیزیم است. الگوی عناصر خاکی نادر این کانی‌ها در دو دسته کلی غنی از عناصر خاکی نادر سنگین و غنی از عناصر خاکی نادر سبک قرار می‌گیرند. مقدار و چگونگی تغییرات عناصر کمیاب این کانی‌ها بیانگر غنی بودن سنگ مادر و فرایند جانشینی عناصر خاکی نادر سنگین و عناصر با شدت میدان بالا با کاتیون‌های دو ظرفیتی در ساختار بلورین است. غنی‌شدگی عناصر خاکی نادر سبک و سنگ دوست بزرگ یون نوع دوم نیز ناشی از عملکرد سیال-های غنی از این عناصر و تابع نسبت ضرایب تفکیک عناصر کانی‌های در حال تعادل، تبلور یا واکنش با بلور گارنت است.

واژه‌های کلیدی: *گارنت؛ عناصر خاکی نادر؛ دگرگونی ناحیه‌ای؛ ایران مرکزی.*

مقدمه

عناصر خاکی نادر شامل ۱۵ عنصر خانواده لانتانیدها و دو عنصر واسط ایتریم و اسکاندیم (به دلیل شباهت‌های زمین‌شیمیایی این دو عنصر) هستند. عناصر خاکی نادر بر اساس رفتارهای زمین شیمیایی به سه گروه عناصر خاکی نادر سبک یا LREE (La, Ce, Pr)، عناصر خاکی نادر متوسط یا MREE (Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy) و عناصر خاکی نادر سنگین یا HREE (Ho, Er, Tm, Yb, Lu) [۱] و یا دو دسته کلی سبک (گروه Ce) از La تا Sm و سنگین (گروه Y) از Eu تا Lu به همراه Y تقسیم می‌شوند [۲]. این عناصر به دلیل بار یونی و شعاع یونی نسبتا بزرگ، برای جایگزینی عناصر اصلی طی تبلور و رشد تمایل کمتری دارند و بیشتر به عنوان عناصر ناسازگار در ماگماهای باقیمانده سرشار از کمپلکس‌های آنیونی هالید، کربنات، فسفات و . . . متمرکز می‌شوند.

ذخایر اقتصادی عناصر خاکی نادر (REE) در محیط‌های زمین‌شناسی متنوعی دیده می‌شوند [۳]. از میان کانی‌های فرعی شاخص در بردارنده تمرکز بالای عناصر خاکی نادر، کانی‌های مونازیت، باستانزیت و زنوتایم اهمیت بیشتری دارند [۲] که اغلب در نفوذی‌های آذرین قلیایی و کربناتیت‌ها متبلور می‌شوند یا خاستگاه منابع پلاسری هستند. افزون بر این سنگ‌ها، عناصر خاکی نادر در بسیاری از سنگ‌های آذرین، رسوبی و دگرگونی به صورت ناچیز وجود دارند. در این سنگ‌ها، عناصر خاکی نادر بیشتر در کانی‌های فرعی مانند پروفسکیت، آپاتیت، زیرکن، اپیدوت (به ویژه آلانیت)، گارنت و رسها متمرکز می‌شوند. در سنگ‌های دگرگونی، کانی‌های گروه گارنت می‌توانند دارای تمرکز بالای عناصر خاکی نادر باشند. این کانی‌های به نسبت شاخص و مهم، در بیش از ۳۰ همبرزاد معدنی با خاستگاه ماگمایی، دگرگونی و دگرنهاده دیده می‌شوند. رفتار زمین شیمیایی و توزیع عناصر کمیاب در گارنت در سیستم‌های آذرین و مدل سازی‌های سنگ‌زایی ماگماها به

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۲۴۳۸۳۷۹۲، نمابر: ۰۳۵۳۸۲۱۱۲۷۹، پست الکترونیکی: Tajbakhsh@yazd.ac.ir

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-03-16]

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.2.9.1]

[DOI: 10.29252/ijcm.28.2.383]

کار برده شده است [۴]. در سنگ‌های دگرگونی نیز، ترکیب کانی شناسی گارنت‌ها اطلاعات باارزشی از ترکیب تعادلی سنگ، دما، فشار، سرعت و زمان بندی رشد بلور را در طیف گسترده‌ای از شرایط فراهم می‌کنند [۵]. تفکیک REE بین گارنت و کلینوپیروکسن به دما، فشار و ترکیب کانی شناسی آنها وابسته بوده و برای محاسبات زمین فشار-دما سنجی مورد استفاده قرار گرفته‌است [۶]. عناصر خاکی نادر طیف گسترده‌ای از رفتارهای توزیع در گارنت‌ها را نشان می‌دهند. عناصر خاکی نادر سبک در گارنت ناسازگارند، ولی عناصر خاکی نادر سنگین سازگاری متوسط تا بالایی دارند. امروزه گارنت‌ها به عنوان یک حامل مهم HREE+Y در نظر گرفته می‌شوند که انواع ماگمایی آن کمتر از ۳ درصد وزنی و انواع دگرگونی تا ۱۳ درصد وزنی این عناصر را در خود جای می‌دهند [۷، ۸].

مهمترین و مستعدترین مناطق احتمالی دارای عناصر خاکی نادر که در ایران مورد پی جویی قرار گرفته‌اند شامل کانسارهای آهن-آپاتیت [۹]، نفوذی‌های آذرین قلیایی [۱۰، ۱۱]، کانسارهای اکسید آهن گرمابی و اسکارنی [۱۲]، کانسارهای جذب سطحی و بازماندی لاتریت‌ها [۱۳]، رگه‌های پگماتیتی، کانسارهای همراه با ذخایر اورانیم [۱۴]، ذخایر وابسته به کانسارهای سرب و فلئوریت [۱۵]، کانسارهای همراه با ذخایر زغال سنگ [۱۶] و کانسارهای پلاسری مونازیت [۱۷] هستند. با وجود بررسی‌های جامع پیرامون رفتار و چگونگی تمرکز عناصر کمیاب درگارنت‌های رخساره‌های دگرگونی ناحیه‌ای نقاط مختلف جهان، تاکنون مقدار عناصر کمیاب و خاکی نادر گارنت‌ها در سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای ایران زمین بررسی نشده است. با توجه به ارزش افزوده و کاربرد روز افزون عناصر خاکی نادر در صنایع مختلف و فراوانی گارنت در انواع سنگ‌ها و رخساره‌های بوم‌های دگرگونه ایران زمین، این پژوهش به بررسی و پتانسیل‌یابی اولیه این عناصر در برخی از رخنمون‌های سنگی سرشار از کانی‌های گروه گارنت بعضی از مجموعه‌های دگرگونی خرد قاره ایران مرکزی می‌پردازد.

روش بررسی

پس از بازدیدهای صحرایی اولیه و نمونه برداری از نقاط مختلف سرشار از گارنت هر مجموعه، از ۲۷ نمونه سنگی مناسب مقطع نازک تهیه و از دید سنگ‌نگاری و سنگ بافتی بررسی شدند. برای تعیین مقدار عناصر کمیاب گارنت‌ها، نخست بلورهای گارنت به صورت دستی از سنگ یا رسوب‌های رودخانه‌ای جدا شده، و سپس با استفاده از میکروسکوپ دو چشمی بلورهای سالم و خالص از هر مجموعه انتخاب شدند. به منظور جداسازی کانی‌های همراه در سطح بلورها یا لبه‌های واکنشی و از بین بردن کربنات‌های احتمالی، نمونه‌ها پس از سایش و خردایش مختصر، با اسید کلریدریک ۰٫۱ مولار و آب مقطر شستشو شدند. لبه بلورهای بسیار درشت گارنت زمان‌آباد تنها با دستگاه برش بریده شد. پس از تهیه حدود ۱۵۰-۵۰ گرم نمونه از نقاط مختلف هر منطقه، نمونه‌ها در آزمایشگاه MS Analitical Laboratoryکانادا به روش طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-MS) تجزیه شدند (جدول ۱ و ۲). برای تعیین نسبت Fe^{2+} به Fe^{3+} گارنت‌ها از تعادل بار و معیارهای عنصرسنجی به روش مرجع [۱۸] استفاده شد. نرم افزارهای grtR4 و Minpet در رسم نمودارها و بررسی‌های کانی شناسی و زمین شیمیایی استفاده شدند.

زمین شناسی

با توجه به فراوانی گارنت و رخنمون لایه‌های سرشار از آن در خرد قاره ایران مرکزی [۱۹]، چهار منطقه ده‌سلم نهبندان در قطعه لوت، دو مجموعه زمان‌آباد و میشدوان در شمال شرق ساغند و جنوب غرب معدن آهن میشدوان بافق در قطعه پشت بادام به همراه مجموعه دگرگونی تنبور در کمربند دگرگونی پهنه سنندج- سیرجان بررسی شدند (شکل ۱). سنگ مادر این مجموعه‌ها بیشتر شامل ردیف‌های رسوبی رسی، کربناتی و کمتر آتشفشانی است که همه دچار دگرگونی چند فازی شده‌اند و اغلب رخساره‌های شیست سبز تا آمفیبولیت را نشان می‌دهند.

مجموعه دگرگونی ده‌سلم: این مجموعه در پهنه ایران مرکزی در مرز صفحه لوت جنوبی و پهنه جوش خورده سیستان واقع است. این مجموعه دگرگونی- ماگمایی بیشتر از سنگ‌های دگرگونی برآمده از سنگ‌های مادر ماسه سنگ، شیل، رسوب‌های کربناتی، مارن و سنگ‌های آتشفشانی هستند که طی سه فاز جداگانه دگرگونی [۲۰] و یا طی یک رویداد دگرگونی ناحیه‌ای در زمان ژوراسیک پسین [۲۱] تشکیل شده‌اند. در شمال این مجموعه، توده‌های گرانیتوئیدی به سن ۱۶۳ تا ۱۶۶ میلیون سال دیده می‌شود که در این مجموعه نفوذ کرده و موجب دگرگونی مجاورتی شده‌اند [۲۲].

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-03-16]
[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.2.9.1]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.2.383]

جدول ۱ نتایج تجزیه شیمیایی اکسیدهای اصلی گارنت‌های مناطق مورد بررسی (برحسب درصد).

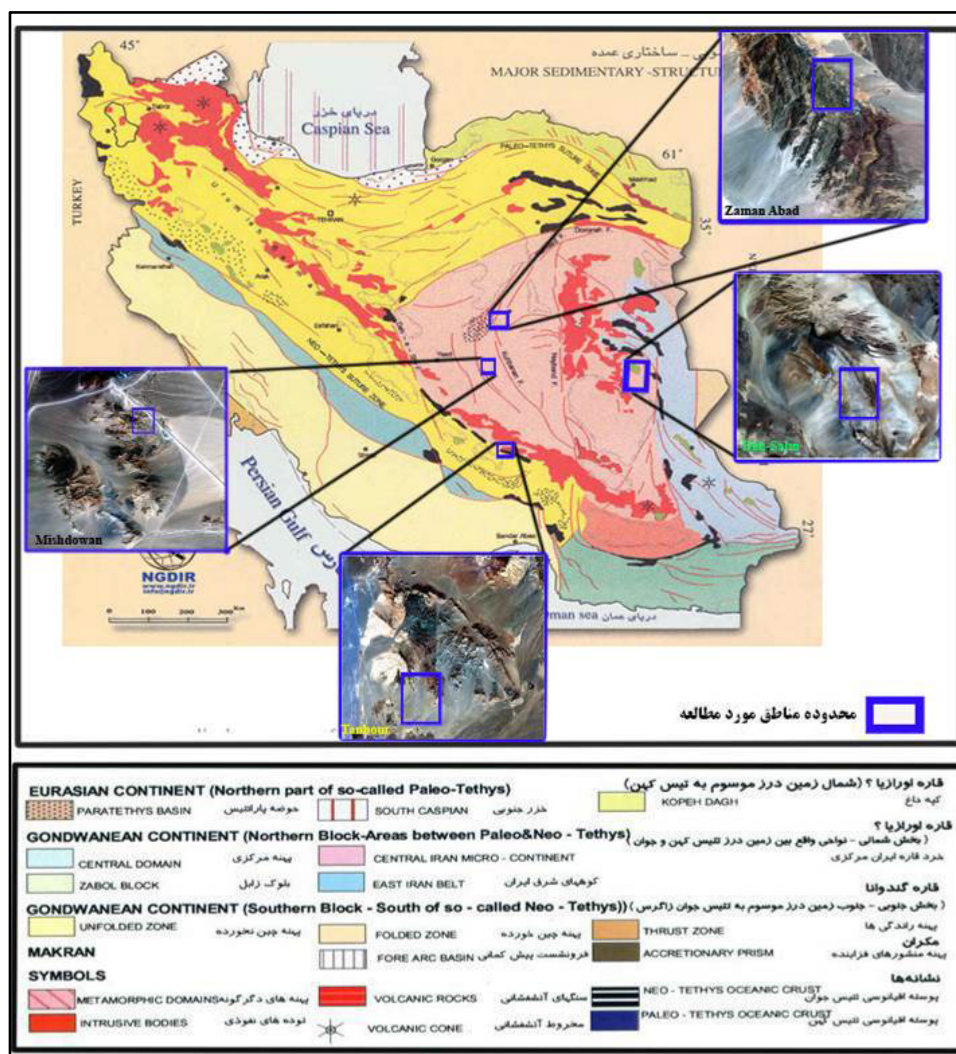
نمونه	ده سلم	میشدوان	تنبور	زمان آباد ۱	زمان آباد ۲
عرض جغرافیایی	"N۶٫۲۱'۱۷°۳۱	"N۲۵٫۶۹'۴۹°۳۱	"N۲۶٫۱۵'۲۶°۲۹	"N۳۸٫۴۴'۴۷°۳۲	"N۵۱٫۰۵'۴۷°۳۲
طول جغرافیایی	"E۱۱٫۰۱'۲۹°۵۹	"E۱۹٫۴۴'۳۱°۵۵	"E۳۰٫۶۵'۵۳°۵۵	"E۵۳٫۷۵'۳۸°۵۵	"E۶۸٫۱۹'۳۹°۵۵
ترکیب اکسید (درصد وزنی)					
SiO_2	۳۵٫۱۹	۴۰٫۰۹	۳۹٫۹۲	۳۸٫۱۶	۴۹٫۶۴
Al_2O_3	۱۹٫۴۱	۱۸٫۷۷	۱۸٫۶۳	۱۸٫۴۷	۱۴٫۳۵
CaO	٫۸۸	۰٫۹۷	۴٫۵۹	۵٫۱۵	۵٫۸۸
Fe_2O_3	۳۴٫۵۹	۳۵٫۵۹	۳۲٫۶۹	۳۴٫۱۴	۲۷٫۶۰
K_2O	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۵	۰٫۲۱
MgO	۱٫۸۴	۱٫۳۲	۲٫۲۰	۲٫۲۸	۱٫۶۷
MnO	۵٫۵۰	۰٫۵۷	۱٫۰۳	۱٫۷۹	۰٫۹۱
Na_2O	۰٫۰۲	۰٫۰۵	۰٫۳۰	۰٫۰۶	۰٫۰۷
P_2O_5	۰٫۰۵	۰٫۱۳	۰٫۱۰	۰٫۲۱	۱٫۶۰
BaO	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱
Cr_2O_3	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۳	۰٫۰۴	۰٫۰۲
SrO	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱
TiO_2	۰٫۱۳	۰٫۵۱	۰٫۸۸	۰٫۹۶	۰٫۵۹
Total	۹۷٫۶۹	۹۸٫۰۸	۱۰۰٫۱۴	۱۰۱٫۳۳	۹۹٫۵۶
تعداد کاتیون ها براساس ۱۲ اکسیژن					
Si	۵٫۹۴ 5.94	۶٫۳۹	۶٫۳۶	۶٫۰۰	۷٫۲۷
Ti	۰٫۰۲	۰٫۳۰	۰٫۱۱	۰٫۳۵	۰٫۱۹
Al	۳٫۸۶	۳٫۵۳	۳٫۵۰	۳٫۴۳	۲٫۶۴
Fe	۴٫۸۸	۴٫۷۵	۴٫۳۶	۴٫۴۹	۳٫۶۰
Mn	۰٫۷۹	۰٫۰۸	۰٫۱۴	۰٫۲۴	۰٫۱۲
Mg	۰٫۴۶	۰٫۳۱	۰٫۵۲	۰٫۵۳	۰٫۳۹
Ca	۰٫۱۶	۰٫۱۷	۰٫۷۸	۰٫۸۷	۰٫۹۸
Na	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۲
K	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۴
سازای گارنت (درصد کسر مولی)					
آلماندین	۷۶٫۵۴	۸۹٫۵۱	۷۵٫۰۹	۷۲٫۶۵	۷۰٫۷۱
پیروپ	۷٫۷۱	۵٫۹۲	۹٫۰۱	۸٫۹۱	۷٫۶۳
اسپسارتین	۱۳٫۱۰	۱٫۴۵	۲٫۴۰	۳٫۹۸	۲٫۳۶
گ.آ.ی.*	۲٫۶۵	۳٫۱۳	۱۳٫۵۱	۱۴٫۴۷	۱۹٫۳۰
مجموع	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
گرسولار	۹۲٫۴۶	۹۲٫۰۲	۹۶٫۹۷	۸۷٫۵۴	۹۳٫۳۲
آندرادیت	۷٫۴۱	۷٫۸۵	۲٫۹۲	۱۲٫۳۴	۶٫۶۰
یواروویت	۰٫۱۳	۰٫۱۳	۰٫۱۰	۰٫۱۳	۰٫۰۹

*مجموع درصد سازنده‌های گرسولار، آندرادیت و یواروویت.

جدول ۲ نتایج تجزیه عناصر کمیاب و خاکی نادر میانگین گارنت‌های مناطق مورد مطالعه به روش ICP-MS.

نمونه	ده سلم	میشدوان	تنبور	زمان آباد ۱	زمان آباد ۲
عناصر کمیاب (ppm)					
Ba	۱۲٫۹۰	۶۶٫۴۰	۱۵٫۵۰	۴۸٫۷۰	۶۰٫۸۰
Nb	۱٫۵۰	۵۲٫۹۰	۱۴٫۸۰	۹٫۱۰	۵۵٫۹۰
Rb	۱٫۰۰	۵٫۳۰	۱٫۵۰	۱٫۶۰	۵٫۹۰
Sr	۴٫۹۰	۴۶٫۷۰	۶٫۸۰	۹٫۴۰	۵۶٫۴۰
Ta	۰٫۴۰	۲٫۲۰	۱٫۲۰	۰٫۸۰	۲٫۳۰
Th	۰٫۹۴	۵٫۲۸	۳٫۷۹	۱٫۳۹	۱٫۶۵
U	۰٫۵۹	۳٫۷۲	۱٫۷۵	۱٫۲۳	۱٫۴۶
Zr	۱۱۴	۶۲۰	۲۱۳	۴۱۵	۵۲۱
عناصر کمیاب خاکی (ppm)					
La	۷٫۱۰	۷۲۰٫۴۰	۲۴٫۷۰	۲۰٫۵۰	۵۱٫۱۰
Ce	۱۶٫۵۰	۱۲۳٫۸۰	۴۶٫۲۰	۴۷٫۷۰	۱۱۶٫۷۰
Pr	۱٫۶۸	۱۶٫۶۸	۵٫۹۲	۵٫۸۶	۱۵٫۴۹
Nd	۶٫۶۰	۶۵٫۱۰	۲۱٫۹۰ 21.90	۲۵٫۳۰	۶۹٫۹۰
Sm	۲٫۵۳	۱۴٫۰۱	۴٫۲۸	۸٫۱۸	۱۷٫۶۱
Eu	۰٫۸۳	۴٫۱۷	۱٫۱۴	۳٫۰۷	۵٫۸۵
Gd	۱۶٫۸۶	۱۸٫۷۷	۶٫۶۶	۲۵٫۳۰	۲۱٫۸۵
Tb	۹٫۶۳	۴٫۳۷	۱٫۸۰	۷٫۵۷	۳٫۵۸
Dy	۱۳۰٫۷۳	۳۲٫۷۱	۱۴٫۸۵	۶۴٫۳۷	۱۸٫۲۴
Ho	۳۷٫۷۰	۶٫۵۰	۳٫۳۶	۱۴٫۵۰	۲٫۶۳
Er	۱۳۳٫۴۷	۱۸٫۲۹	۱۰٫۷۰	۴۱٫۸۹	۵٫۸۷
Tm	۲۲٫۴۳	۲٫۷۱	۱٫۷۷	۶٫۳۷	۰٫۷۲
Yb	۱۴۳٫۷۹	۱۵٫۹۶	۱۱٫۶۸	۳۹٫۱۸	۴٫۰۱
Lu	۲۲٫۱۹	۲٫۳۶	۱٫۹۰	۵٫۹۲	۰٫۵۵
Y	۱۱۲۲٫۵۰	۱۷۴٫۷۰	۹۲٫۲۰	۴۰۴٫۶۰	۶۹٫۷۰
∑REE	۵۵۲٫۰۴	۳۹۷٫۸۳	۱۵۶٫۸۶	۳۱۵٫۷۱	۳۳۴٫۱۰
∑LREE	۳۵٫۲۴	۲۹۶٫۱۶	۱۰۴٫۱۴	۱۱۰٫۶۱	۲۷۶٫۶۸
∑HREE	۵۱۶٫۸۰	۱۰۱٫۶۷	۵۲٫۷۲	۲۰۵٫۱۰	۵۷٫۴۵
Y+∑REE	۱۶۷۴٫۵۴	۵۷۲٫۵۳	۲۴۹٫۰۶	۷۲۰٫۳۱	۴۰۳٫۸۰
Eu/Eu^*	۰٫۳۹	۰٫۷۹	۰٫۶۵	۰٫۶۵	۰٫۹۱
Ce/Ce^*	۳٫۷۰	۲٫۷۶	۲٫۹۶	۳٫۳۷	۳٫۲۰
$La_{(N)}/Eu_{(N)}$	۲٫۰۹	۴٫۲۵	۵٫۳۰	۱٫۶۳	۲٫۱۴
$Lu_{(N)}/Eu_{(N)}$	۶۱٫۰۵	۱٫۲۹	۳٫۸۰	۴٫۴۰	۰٫۲۱

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-03-16]
[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.2.9.1]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.2.383]



شکل ۱ جایگاه مناطق مورد بررسی در نقشه ایالت‌های ساختاری ایران [۱۹].

مجموعه دگرگونی زمان‌آباد: این مجموعه بخشی از مجموعه‌های دگرگونی بنه شورو و تاشک از پهنه ایران مرکزی است که بیشتر در کوه‌های ناتک، زمان‌آباد و پلو در شرق گسل پشت بادام گسترش دارند. مجموعه بنه شورو شامل از میکاشیست، گنیس، آمفیبولیت، مرمر و کوارتزیت است که آمفیبولیت‌های دارای گارنت‌های درشت گسترش بیشتری دارند. سن سنگ مادر آمفیبولیت‌ها حدود ۵۴۷ میلیون سال اندازه گیری شده‌است [۲۳] که در تناوب با میکاشیست‌ها قرار دارد و به وسیله توده‌های گرانیتی مورد هجوم قرار گرفته‌اند. سازند تاشک به طور ناپیوسته روی مجموعهٔ بُنه شورو قرار دارد و شامل حدود ۲۰۰۰ متر صفحه‌های همگن، ماسه سنگ تیره دانه‌ریز و ماسه‌سنگ آرکوزی است که در اثر دگرگونی به شیست، فیلیت، اسلیت، میکا شیست و ماسه سنگ تیره دگرگونه تبدیل شده‌اند.

مجموعه دگرگونی میشدوان: سنگ‌های این سری در شمال شرق بافق و جنوب معدن سنگ آهن میشدوان در قطعه پشت بادام برونزد دارند. این مجموعه در نقشه زمین شناسی پشت بادام، بخشی از مجموعه بنه شورو به سن پرکامبرین و در ورقه اسفوردی، مجموعه درهم میشدوان نامیده شده است. سنگ مادر این مجموعه نیز بیشتر ردیفی رسی، ماسه سنگ و سنگ آهک با بین لایه‌هایی از توف و سنگ‌های آذرین است که در رخساره آمفیبولیت و شیست سبز طی چند فاز دگرگونی تغییر یافته‌اند.

مجموعه دگرگونی تنبور: مجموعه دگرگونی تنبور به سن پالئوزوئیک در شرق سیرجان و آخر پهنه دگرگونی سنندج- سیرجان قرار دارد. سنگ مادر سنگ‌های دگرگونی بیشتر رسی- مارنی و آهکی به همراه نفوذی‌های بازی است که طی سه [۲۴] یا چهار فاز دگرگونی [۲۵] در رخساره‌های شیست

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-03-16]
[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.2.9.1]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.2.383]

سبز تا آمفیبولیت دگرگون شده‌اند. سن دقیق دگرگونی مشخص نیست، اما به احتمال بسیار می‌توان بسته شدن اقیانوس نئوتتیس و برخورد قاره‌ای صفحه عربستان با خرده قاره ایران مرکزی [۲۶] و یا فاز کوهزایی سیمرین پیشین [۲۵] را در تشکیل این سنگ‌های دگرگونی موثر دانست.

سنگ شناسی و شیمی کانی گارنت

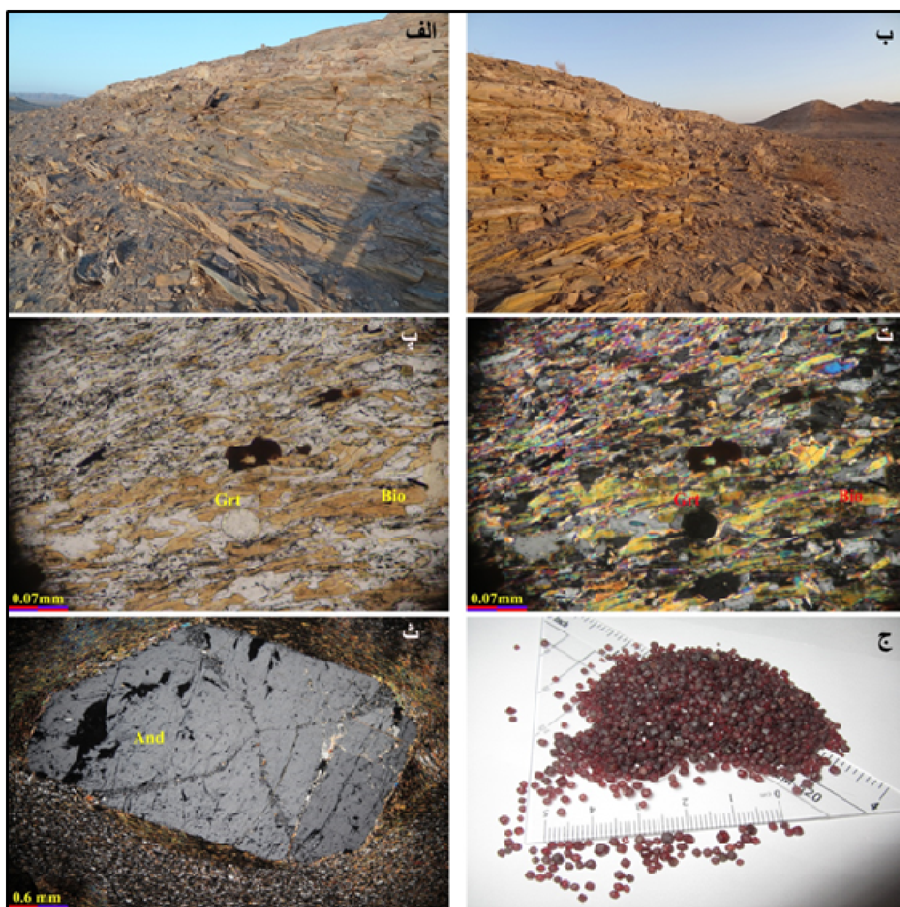
مجموعه دگرگونی ده‌سلم: سنگ‌های دگرگونی این مجموعه اغلب شامل اسلیت، فیلیت، شیست (شکل‌های ۲ الف و ب)، آمفیبولیت و مرمر است که در سه بخش سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای، دگرگونه‌های دما بالا و سنگ‌های دگرگونی مجاورتی جای می‌گیرند [۲۰]. حجم بسیاری از مجموعه دگرگونی ده‌سلم را شیست‌های گارنت و آندالوزیت دار تشکیل می‌دهد. سیلمانیت شیست و گارنت - استارولیت شیست‌ها نیز بیشتر در توده اصلی و جنوب غربی مجموعه دیده می‌شوند. بهرام نژاد و همکاران [۲۱]، سنگ‌های رسی دگرگونه‌های مجموعه ده‌سلم را از غرب به شرق شامل گارنت‌شیست، استارولیت - گارنت‌شیست، آندالوزیت- گارنت‌شیست، گارنت -بیوتیت گنیس و میگماتیت می‌دانند که نشان از افزایش دمای دگرگونی و کاهش فشار به سوی شرق دارد. مقدار گارنت در شیست‌های بخش جنوب غربی قابل توجه است، به طوری که شیست‌های گارنت دار، یک واحد سنگی متمایز بوجود آورده اند. گارنت شیستها با بافت شکفته بلوری- ورقه شکفتی بیشتر دربردارنده شکفته بلورهای گارنت ریز و شفاف و بدون میانبار در زمینه‌ای از کوارتز، بیوتیت، مسکویت، کلریت و آلبیت هستند (شکل‌های ۲ پ و ت). استارولیت در حال تبدیل به بیوتیت، کیاستولیت و سیلیمانیت، شکفته‌بلورهای درشت‌تر این سنگ‌ها هستند. کیاستولیت‌ها با چند سانتی متر طول اغلب خود شکل هستند (شکل۲ ث). با افزایش مقدار آندالوزیت در سنگ‌ها، از فراوانی گارنت کاسته شده‌است. در اثر هوازدگی این سنگ‌ها، گارنت‌های مقاوم تر به مقدار قابل توجهی در رسوب‌های رودخانه‌ای نزدیک رخنمون‌ها انباشته شده‌اند. بلورهای گارنت در حد میلیمتر و به ندرت تا ۳ میلیمتر اغلب به رنگ قرمز تا قهوه‌ای (شکل ۲ ج) اما در استارولیت شیست‌ها روشن تر و شفاف تر هستند [۲۰]. ترکیب کانی شناسی میانگین گارنت‌های ده‌سلم شامل ۷۶٫۵۳ درصد آلماندین، ۷٫۷۱ درصد پیروپ، ۱۳٫۱۱ درصد اسپسارتین و ۲٫۶۵ درصد گرسولار، آندرادیت و یواروویت ($Alm_{76.53}Pyr_{7.71}Sps_{13.11}$ $GAU_{2.65}$) است (شکل ۳). این ترکیب با نتایج تجزیه‌های ریزپردازشی الکترونی [۲۱] همخوانی دارد. نتایج تجزیه ریزپردازش الکترونی گارنت‌های موجود در سنگ های رسی دگرگونه مجموعه دگرگونی ده‌سلم نشان از روند افزایشی عناصر Mg و Fe و کاهشی Mn از مرکز به لبه بلور دارد. همچنین از غرب به سمت شرق، ترکیب گارنت‌ها از آلماندن غنی از اسپسارتین به آلماندن غنی از سازای پیروپ تغییر می‌کند. روند افزایشی و تدریجی Fe و Mg و روند کاهشی Mn از مرکز به لبه درشت بلورهای گارنت می‌تواند نشانه رشد پیوسته و سریع و نبود دگرگونی برگشتی باشد [۲۰].

مجموعه دگرگونی زمان‌آباد: پایین‌ترین بخش‌های مجموعه دگرگونی بنه شورو در غرب کوه ناتک (کوه اسکمبیلو) شامل ردیف ستبری از میکاشیست، بیوتیت آمفیبول شیست، گارنت شیست و استارولیت شیست با میان لایه‌هایی از آمفیبولیت، مرمر، کوارتزیت و سرپانتینیت است (شکل ۴). این ردیف به طرف بالا به تناوبی از گنیس و آمفیبولیت با ساخت‌های نواری و به طور جانبی به واحدهای گنیس بیوتیت-آمفیبول‌دار و گنیس صورتی تبدیل می‌شود.

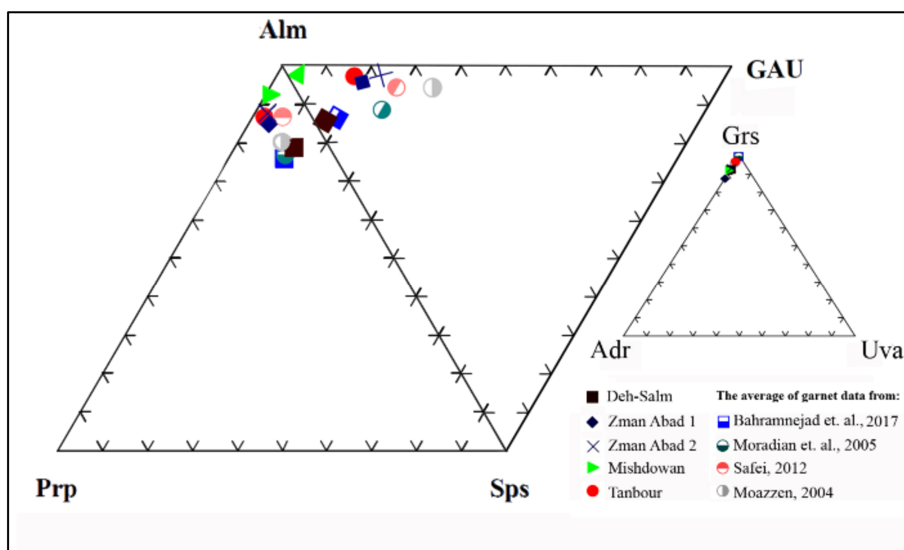
بافت عمده قابل مشاهده در گارنت شیست‌ها شکفته‌بلوری – ورقه شکفتی (تا نخ شکفتی) و غربالی و در انواع دانه درشت تر، گاه دانه شکفتی با زمینه‌ای از بلورهای متوسط تا درشت کانی‌های کوارتز، بیوتیت، مسکویت، آمفیبول و تورمالین است. گارنت آمفیبولیت‌ها بافت شکفته بلوری - نخ شکفتی و در برخی نقاط دانه شکفتی نشان می‌دهند که افزون بر آمفیبول سبز-آبی و پلاژیوکلاز، کانی‌های اپیدوت، کلریت، بیوتیت و اسفن نیز دارند. گارنت، استارولیت و آمفیبول سبز-آبی عمده شکفته بلورهای این منطقه هستند (شکل ۵). آمفیبول‌ها از نوع کلسیمی و از نوع هاستنگزیت- چرماکیت هستند [۲۷]. گارنت‌ها بر پایه جایگاه و رخساره دگرگونی حاکم بر سنگ‌ها به دو صورت دیده می‌شوند: نوع اول شامل بلورهای خود شکل دارای وجوه بلورین متوسط تا درشت (حدود ۰٫۵ تا ۱٫۵ سانتی متر) به رنگ قهوه‌ای تیره تا سیاه و کم و بیش دارای منطقه‌بندی شیمیایی (زمان‌آباد ۱) و نوع دوم به صورت گارنت‌های بزرگ به رنگ قرمز تا قهوه‌ای به ابعاد چند سانتی متر که بیشتر مجموعه‌های چند بلوری با هم رشد کرده‌اند و غده مانند هستند (زمان‌آباد ۲، شکل ۴ ب). گارنت‌های بزرگ به صورت غربالی سرشار از میانبارهای کوارتز، بیوتیت، زیرکن، اپیدوت، آمفیبول، کانی کدر و ... هستند (شکل‌های ۵ پ و ت) که نشانه نبود زمان کافی برای ایجاد تعادل و همگن سازی بلور است.

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-03-16]
[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.2.9.1]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.2.383]

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-03-16]
[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.2.9.1]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.2.383]



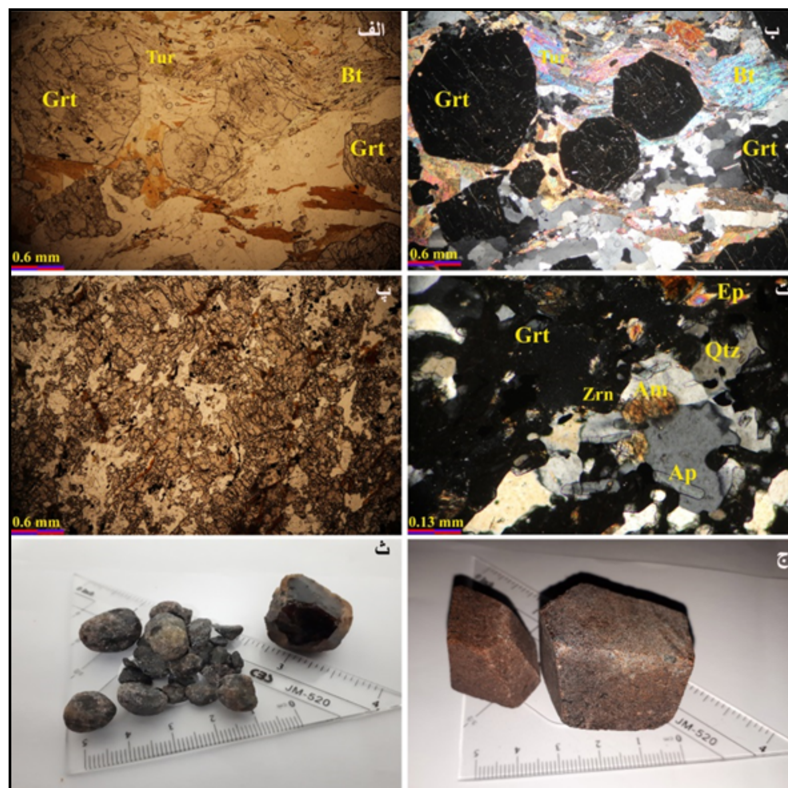
شکل ۲ الف و ب) ردیف میکاشیست‌های گارنت دار ده‌سلم (دید به سوی شرق)، پ و ت) بلورشفاف و خودشکل گارنت در میکاشیست به‌ترتیب در نور قطبیده صفحه‌ای (PPL) و متقاطع (XPL)، ث) بلور خودشکل و پیش از زمین‌ساخت کیاستولیت (XPL) و ج) بلورهای گارنت جدا شده ده‌سلم.



شکل ۳ ترکیب کانی شناسی میانگین گارنت‌های مناطق مورد بررسی و مقایسه آنها با میانگین نتایج تجزیه ریزپردازش الکترونی پیشین [۱۱، ۱۴، ۱۹، ۲۰]. علائم اختصاری عبارتند از Alm: آلماندین، Prp : پیروپ، Sps: اسپسارتیت، .G.A.U: مجموع گرسولار، آندرادیت و یواروویت، Grs: گرسولار، Adr: آندرادیت و Uva: یواروویت.



شکل ۴ الف) تناوب گارنت و استارولیت شیست مجموعه دگرگونی بنه شورو و تاشک (دید به سوی جنوب)، ب) بلورهای بسیار درشت گارنت (زمان‌آباد ۲). پ و ث) بلورهای خود شکل استارولیت در استارولیت شیست زمان‌آباد.

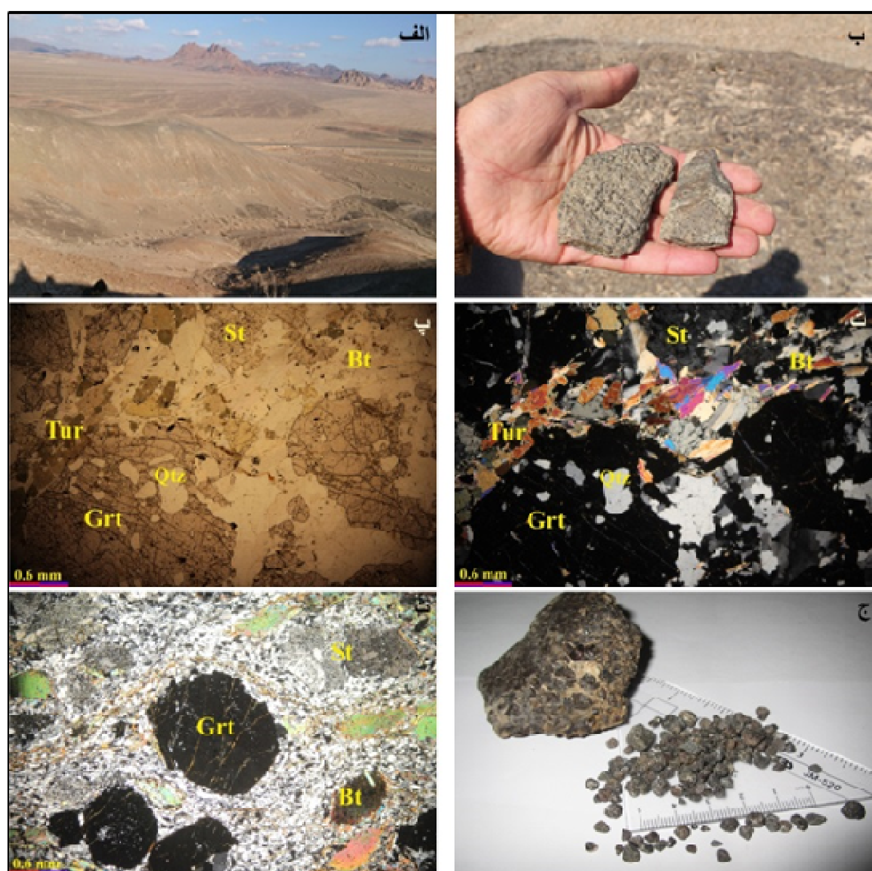


شکل ۵ الف و ب) بلورهای خود شکل و دارای منطقه بندی زمان‌آباد ۱ به ترتیب در نورهای PPL و XPL، پ) تصویر میکروسکوپی بخشی از گارنت زمان‌آباد ۲ (PPL)، ت) میانبارهایی از کانی‌های زیرکن، آمفیبول، آپاتیت، اپیدوت و کوارتز در گارنت زمان‌آباد ۲ (XPL)، ث) بلورهای جدا شده گارنت زمان‌آباد ۱ و ج) بلورهای گارنت جدا شده و برش خورده زمان‌آباد ۲.

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-03-16]
[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.2.9.1]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.2.383]

ترکیب کانی شناسی میانگین گارنت‌های زمان‌آباد ۱ به صورت ۷۲/۶۵ درصد آلماندین، ۸/۹۱ درصد پیروپ، ۳/۹۷ درصد اسپسارتین و ۱۴/۴۷ درصد گرسولار، آندرادیت و یواروویت ($Alm_{72.65}Pyr_{8.91}Sps_{3.97}$ $GAU_{14.47}$) و ترکیب یک بلور گارنت بزرگ (زمان‌آباد ۲) ۷۰/۷۱ درصد آلماندین، ۷/۶۳ درصد پیروپ، ۲/۳۶ درصد اسپسارتین و ۱۹/۳۰ درصد گرسولار، آندرادیت و یواروویت ($Alm_{70.71}Pyr_{7.63}Sps_{2.36}$ $GAU_{19.30}$) است (شکل ۳). گورابجیری و همکاران، [۲۷] گارنت موجود در آمفیبولیت‌ها را از نوع آلماندین- گرسولار گزارش کرده‌اند.

سری میشدوان: این مجموعه از قدیم به جدید شامل سنگ-هایی از نوع میکاشیست، گارنت شیست، گارنت استارولیت شیست، آمفیبول شیست، گنیس، شیست آهکی، مرمر و دولومیت‌های دگرگون شده‌است. میکاشیست‌ها بیشتر دارای بلورهای بیوتیت، مسکویت، گارنت و کوارتز و به ندرت کانی‌های استارولیت، کیانیت، اپیدوت، اسفن، فلدسپار و ... هستند. به دلیل اختلاف ترکیب لایه بندی اولیه سنگ رسوبی مادر، در برخی نقاط بخش‌های سرشار از استارولیت و گارنت تشکیل شده‌است (شکل‌های ۶ الف و ب). این بیانگر چیرگی دما و فشار رخساره‌های شیست سبز تا آمفیبولیت است. بر اثر نفوذ توده‌های اسیدی و هجوم سیال‌های بعدی، کانی‌های آندالوزیت، کمی کردیریت و سپس تورمالین در این سنگ‌ها به وجود آمده‌است (شکل‌های ۶ پ تا ث). بافت شایع این سنگ‌ها، ورقه شکفتی، شکفته بلوری و میلونیتی است که شکفته بلورهای گارنتِ در حال کلریتی شدن، آمفیبول از نوع ترمولیت و اکتینولیت، استارولیت و آندالوزیت در سنگ دیده می‌شوند. گارنت‌ها خود شکل تا بی شکل و دارای میانبارهای کوارتز و بیوتیت هستند. ترکیب کانی شناسی میانگین گارنت‌های میشدوان شامل ۸۹/۵ درصد آلماندین، ۵/۹۲ درصد پیروپ، ۱/۴۵ درصد اسپسارتین و ۳/۱۳ درصد گرسولار، آندرادیت و یواروویت ($Alm_{89.50}Pyr_{5.92}Sps_{1.45}GAU_{3.13}$) است(شکل ۳).



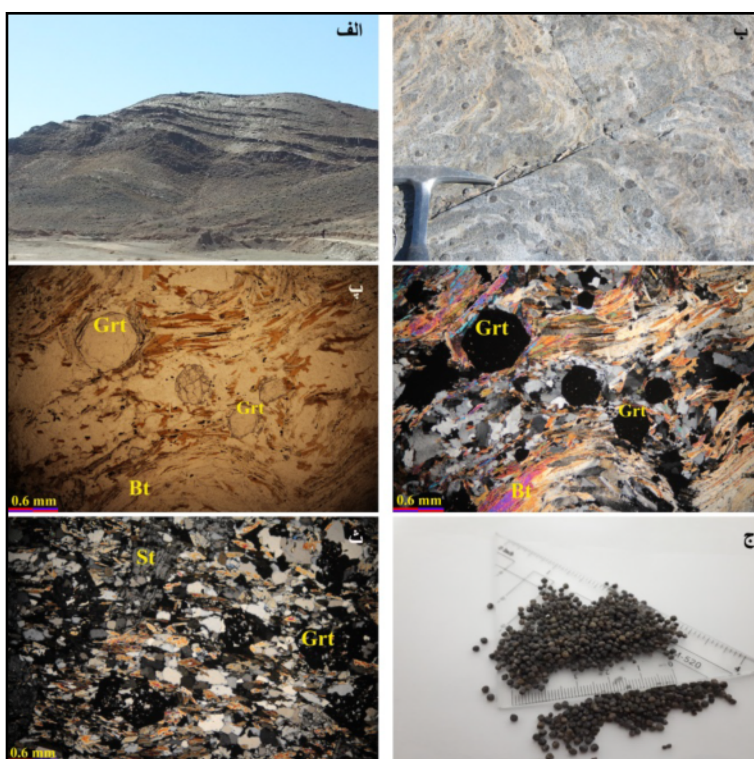
شکل ۶ الف) بخش غنی از گارنت (لایه تیره‌رنگ در دره) مجموعه میشدوان (دید به سوی شمال)، ب) همان نظر در نمای نزدیک تر، پ و ت) تصویر میکروسکوپی گارنت شیست و رشد تورمالین در لبه گارنت و استارولیت به ترتیب در نورهای PPL و XPL، ث) بلورهای خودشکل گارنت و استارولیت پیش از زمین ساخت (XPL) و ج) بلورهای گارنت جدا شده میشدوان.

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-03-16]
[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.2.9.1]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.2.383]

مجموعه دگرگونی تنبور: بخش عمده مجموعه تنبور را سنگ‌های دگرگونی چون کلریت شیست، بیوتیت شیست، گارنت شیست، آمفیبول شیست، کوارتزیت، گنیس، مرمر و شیست‌های بازی تشکیل می‌دهند (شکل‌های ۷ الف و ب). کانی‌های ناشی از دگرگونی توالی رسی شامل مسکویت، کلریت، بیوتیت، گارنت، کوارتز، پلاژیوکلاز و استاورولیت هستند که رخساره‌های شیست سبز تا آمفیبولیت را نشان می‌دهند. ظهور کانی استاورولیت برآمده از فاز بعدی دگرگونی پیشرونده است [۲۵].

میکاشیست‌های این منطقه بیشتر دارای بافت ورقه شکفتی و شکفته بلوری بوده که مهمترین و اصلی ترین درشت بلورهای موجود در آنها گارنت خود شکل و گاه بی شکل، استارولیت و بیوتیت در زمینه‌ای از کانی‌های کلریت، بیوتیت، کوارتز، کانی‌های کدر، اسفن، زوئیزیت و زیرکن هستند (شکل‌های ۷ پ، ت و ث). بررسی ساختار داخلی شکفته بلورهای گارنت نشان می‌دهد که در چند فاز تبلور یافته‌اند [۲۸] و رشد آنها در سه مرحله پیش از زمین ساخت، همزمان با زمین ساخت و پس از آن رخ داده است. [۲۴]. تشکیل نوارهای غنی و بسیار متراکم گارنت در برخی نقاط به تغییرات فشار و دما به همراه فعالیت سیال‌ها و عملکرد پهنه‌های برشی نسبت داده شده‌است [۲۹].

ترکیب کانی شناسی میانگین گارنت‌های تنبور دارای ۷۵٫۰۹ درصد آلماندین، ۹٫۰۱ درصد پیروپ، ۲٫۳۹ درصد اسپسارتین و ۱۳٫۵۱ درصد گرسولار، آندرادیت و یواروویت ($Alm_{75.09}Pyr_{9.01}Sps_{2.39}$ $GAU_{13.51}$) است (شکل ۳). نتایج تجزیه ریزپردازش الکترونی، ترکیب گارنت‌های موجود در سنگهای این منطقه را دارای ۶۸٫۵۴۴ تا ۶۰٫۰۶۵ درصد آلماندن ۱۹٫۹۸ تا ۱۶٫۸۸ درصد گروسولار و ۷٫۰۸ تا ۵٫۴۲ درصد اسپسارتین نشان می‌دهد که گارنت‌های آمفیبول شیست نسبت به میکاشیست دارای سازای آلماندین بیشتر و گرسولار کمتری هستند [۳۰]. این گارنت‌ها سازنده پیروپ بسیار پایینی دارند و غنی از آلماندین با مقدار قابل ملاحظه‌ای سازای گرسولار هستند [۳۱]. کاهش مقدار منگنز و کلسیم از هسته به لبه گارنت‌ها می‌تواند در ارتباط با رشد در پهنه استارولیت [۲۸] یا ناشی از افزایش دما باشد [۲۵].

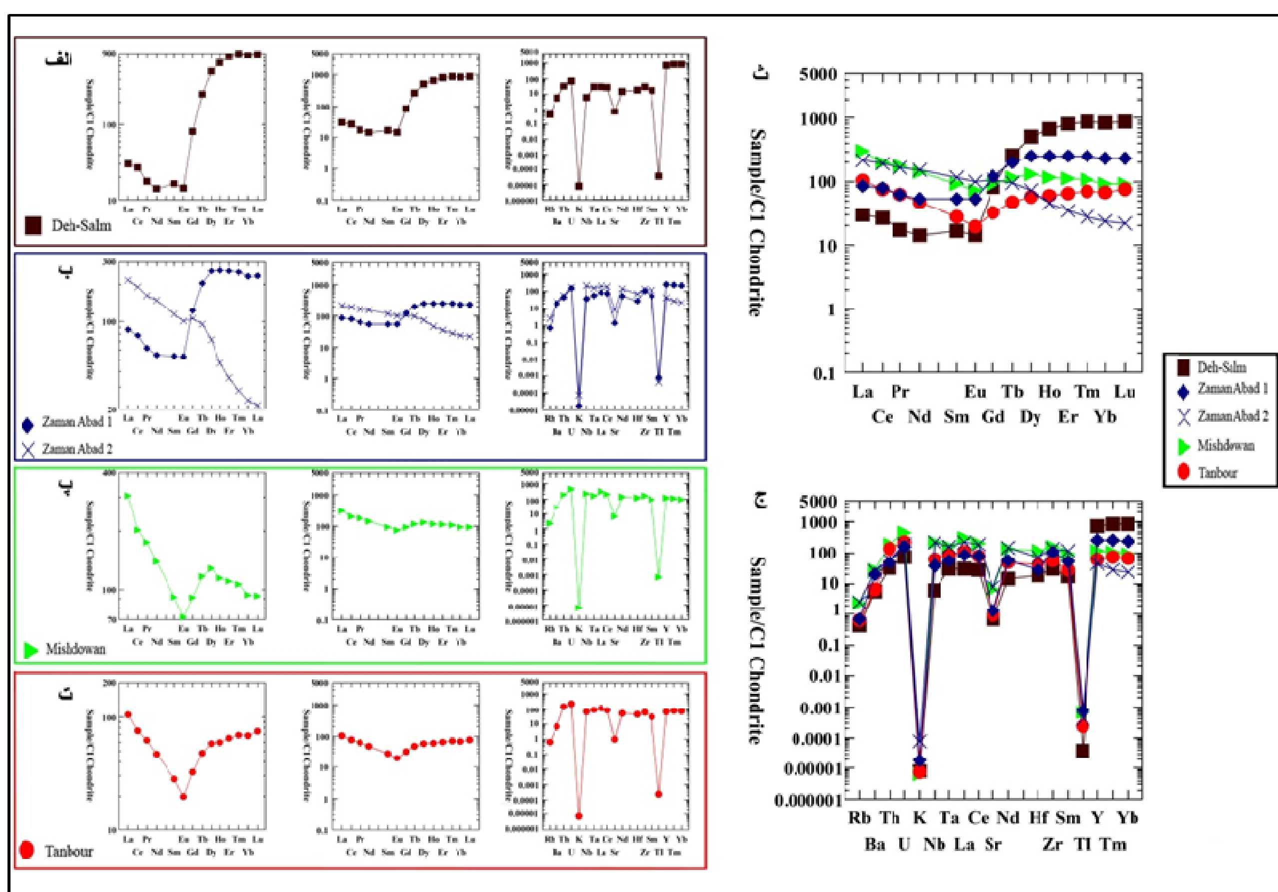


شکل ۷ الف) میکاشیست‌های مجموعه دگرگونی تنبور (دید به سوی شمال)، ب) بلورهای گارنت در میکاشیست‌ها، پ و ت) تصویر میکروسکوپی بلورهای گارنت خود شکل در گارنت میکاشیست به ترتیب در نورهای PPL و ب) همان در XPL، ث) تصویر میکروسکوپی استاورولیت گارنت شیست (XPL). ج) بلورهای گارنت جدا شده تنبور.

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-03-16]
[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.2.9.1]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.2.383]

زمین شیمی

الگوهای غنی‌شدگی عناصر خاکی نادر نمونه‌های مورد بررسی نسبت به کندریت [۳۲]، در شکل ۸ نشان داده شده‌اند. در تقسیم بندی عناصر خاکی نادر سنگین و سبک از مرجع [۲] استفاده شده‌است. به جز گارنت‌های زمان‌آباد ۲، الگوهای هر چهار منطقه دارای نقطه عطفی در عنصر Eu هستند که کمترین غنی‌شدگی را نسبت به کندریت دارند. به عبارتی از عنصر Eu، روند نزولی الگوی LREEها به روندی صعودی برای HREEها تبدیل شده و بیشترین غنی‌شدگی در عناصر انتهایی هر دو گروه سنگین و سبک است. این سبک غنی‌شدگی و تهی شدگی سبب ایجاد دو الگوی اصلی و متفاوت شده که در هر دو، غنی‌شدگی همه عناصر خاکی نادر بیش از ۱۰ برابر کندریت است: نخست الگوی معمولی یا غنی از HREEکه در گارنت‌های زمان‌آباد ۱ و ده‌سلم دیده می‌شود. شیب کم این الگو برای LREEها با نسبت $La_{(N)}/Eu_{(N)}$ برابر با ۲/۱ در ده‌سلم و ۱/۶ در زمان‌آباد مشخص شده و با افتادگی Nd نسبت به عناصر همسایه همراه است. برعکس HREEها، غنی‌شدگی بیشتری در مقایسه با LREEها نشان می‌دهند و دارای نسبت $Lu_{(N)}/Eu_{(N)}$ برابر با ۶۱ در ده‌سلم و ۴/۴ در زمان‌آباد هستند. دومین الگو، الگوی LREEهای غنی شده یا V شکل است که در نمونه‌های تنبور و میشدوان دیده می‌شود. این الگو دارای غنی‌شدگی شدید از Eu به سمت La با نسبت $La_{(N)}/Eu_{(N)}$ برابر با ۵/۳ و ۴/۲ و $Lu_{(N)}/Eu_{(N)}$ کمتری برابر با ۳/۸ و ۱/۳ در تنبور و میشدوان است. در الگوی نوع دوم، برخی از عناصر خاکی نادر سبک از سنگین نیز غنی‌شدگی بیشتری نشان می‌دهند. در میشدوان، غنی‌شدگی عناصر از Dy تا Lu کمتر می‌شود.



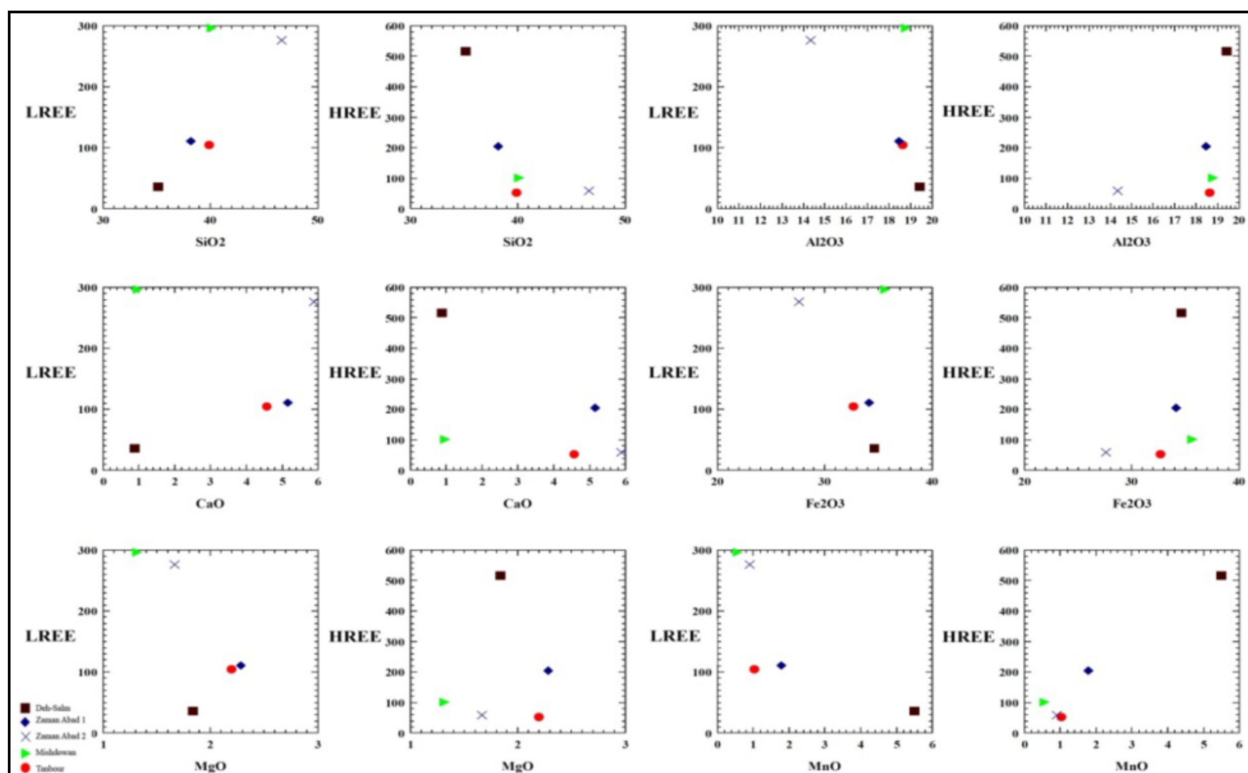
شکل ۸ الگوهای عناصر خاکی نادر و کمیاب بهنجار شده به کندریت [۳۲] گارنت‌های مورد بررسی: الف) ده‌سلم، ب) زمان‌آباد ۱ و ۲، پ) میشدوان و ت) تنبور، ث) مقایسه الگوی عناصر خاکی نادر نمونه‌های مناطق مختلف، ج) مقایسه الگوی عناصر کمیاب نمونه‌های مناطق مختلف.

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-03-16]
[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.2.9.1]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.2.383]

بیشترین غنی‌شدگی HREE ها در ده‌سلم ppm ۵۱۶٫۸ و پس از آن به ترتیب در زمان‌آباد ۱ (ppm ۲۰۵٫۱)، میشدوان (ppm ۱۰۱٫۶۷) و تنبور (ppm ۵۲٫۷۲) است. از سوی دیگر، بیشترین غنی‌شدگی LREEها به ترتیب در میشدوان (ppm ۲۹۶٫۱۶)، زمان‌آباد (ppm ۱۱۰٫۶۱)، تنبور (ppm ۱۰۴٫۱۴) و ده‌سلم (ppm ۳۵٫۲۴) دیده می‌شود (شکل‌های ۸ ث و ۹). بیشترین مقدار Y نیز در گارنت‌های ده‌سلم با ppm ۱۱۲۲ و کمترین آن با ppm ۶۹٫۷ در گارنت‌های میشدوان دیده می‌شود که با تغییرات مقدار HREE در گارنت‌ها همخوانی دارد. عنصر Eu ناهنجاری منفی ناچیزی در همه نمونه‌ها نشان می‌دهد. نسبت Eu/Eu^* برای نمونه‌های ده‌سلم، زمان‌آباد ۱، تنبور، میشدوان و زمان‌آباد ۲ به ترتیب برابر با ۰٫۳۹، ۰٫۶۵، ۰٫۶۵، ۰٫۷۹ و ۰٫۹۱ است.

در شکل ۹، مقدار تغییرات این عناصر نسبت به برخی از اکسیدهای اصلی نشان داده شده‌است. مقدار LREEها در گارنت‌های مناطق مورد بررسی با SiO_2، CaO و MgO همبستگی مثبت و با Al_2O_3، Fe_2O_3 و MnO همبستگی منفی نشان می‌دهند. به همین ترتیب مقدار HREE نمونه‌ها با تغییرات SiO_2، CaO و MgO همبستگی منفی و با Al_2O_3، Fe_2O_3 و MnO همبستگی مثبتی نشان می‌دهند. در این میان، وابستگی این تغییرات به مقدار SiO_2، Al_2O_3 و MnO شدیدتر است.

عناصر سنگ دوست Rb، Ba و Sr همه نمونه‌ها نسبت به کندریت [۳۲] کمترین غنی‌شدگی را دارند که بیشینه این عناصر در میشدوان دیده می‌شود (شکل ۸ ج). عناصر با شدت میدان بالا (HFSE) چون Ta، Nb، Hf و Zr نیز رفتاری مشابه عناصر خاکی نادر دارند و نسبت به کندریت [۳۲] غنی شده‌اند. عناصر U و Th حدود ۲۰ تا ۳۰۰ برابر کندریت غنی شده‌اند.



شکل ۹ تغییرات LREEها و HREEها نسبت به اکسیدهای اصلی گارنت‌ها.

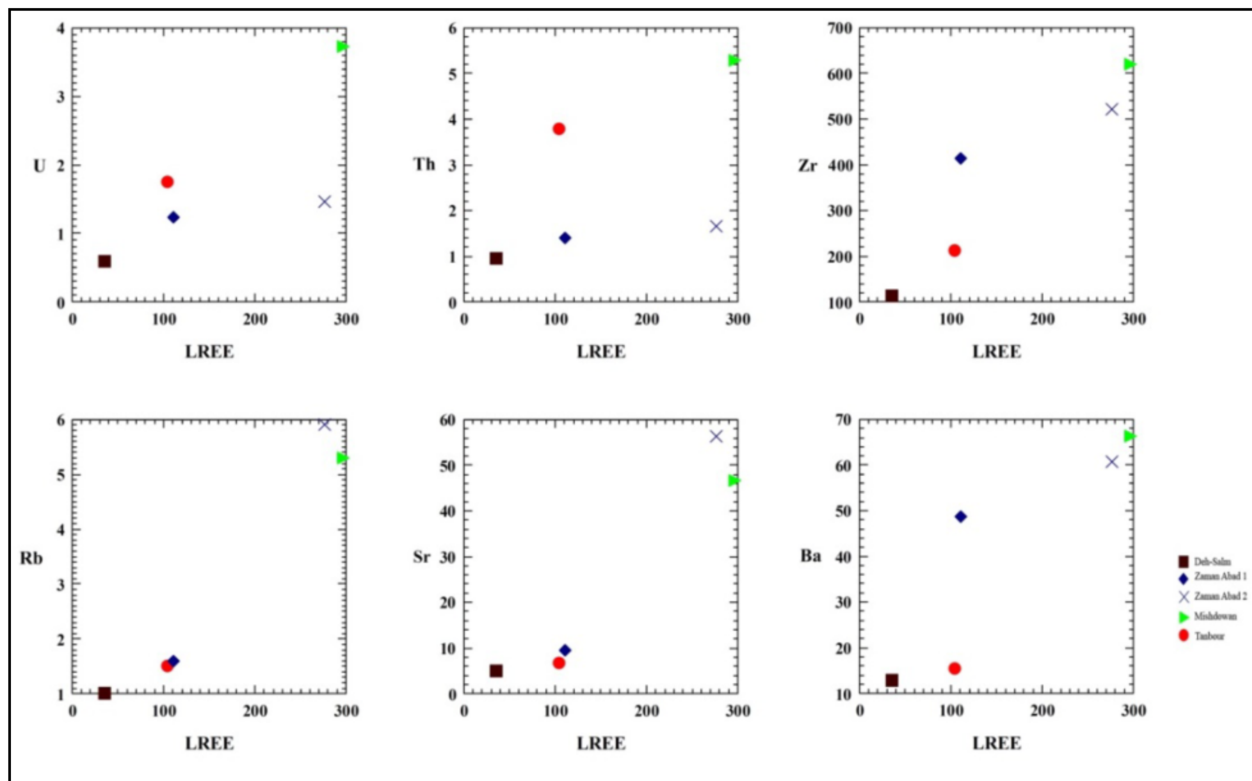
[Downloaded from ijcm.ir on 2025-03-16]
[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.2.9.1]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.2.383]

بحث

نوع و مقدار تمرکز عناصر خاکی نادر در گارنت‌های دگرگونی به مقدار اولیه این عناصر در سنگ مادر، شیمی- بلور گارنت، آهنگ رشد، ضرایب تفکیک، ترکیب شیمیایی سیال‌های احتمالی، نسبت حجم آب به سنگ (W/R) و شرایط فشار- دما بستگی دارد [۳۳]. چهار سازوکار اصلی برای توزیع عناصر کمیاب در بلورها معرفی شده‌است جذب سطحی، لخته شدگی، جایگزینی و محلول جامد [۳۴]. دو فرایند نخست با سینتیک رشد و دو فرایند بعدی با شیمی بلور کنترل می‌شوند. از این چهار سازوکار، تاکنون جایگزینی یونی بیشتر بررسی شده است. در کانی‌های گروه گارنت با فرمول شیمیایی کلی $X_3Y_2Z_3O_{12}$، جایگاه X مربوط به کاتیون‌های دو ظرفیتی (Ca، Mg، Mn و Fe^{2+}) با همارایی ۸، جایگاه Y برای کاتیون‌های سه ظرفیتی (Fe^{3+}، Al و Cr) با همارایی ۶ و جایگاه Z با همارایی ۴ مربوط به Si است [۳۴]. با توجه به نوع و شعاع یونی کاتیون، عناصر خاکی نادر فقط در جایگاه X جانشین عنصر میزبان می‌شوند. در فشارهای بالای دگرگونی، با توجه به ساختار فشرده گارنت، عناصر کمیاب با شعاع یونی کوچکتر (از جمله HREEها) ترجیح داده می‌شوند [۳۵]. جانشینی REEهای سه ظرفیتی با کاتیون‌های دو ظرفیتی در جایگاه X گارنت نیاز به جابجایی و جایگزینی یونی در جایگاه‌های دیگر به منظور ایجاد تعادل بار اصلی دارد. در توجیه چگونگی جانشینی Y+REE، چهار سازوکار پیشنهاد شده‌است [۸]: (۱) جانشینی گارنت ایتریوم آلومینیوم (YAG) که در گارنت‌های غنی از اسپسارتیت پگماتیت‌ها و گارنت‌های دگرگونی معرفی شده‌است: $[^{X}(Y,REE)^{3+}{}_1{}^{Z}(Al^{3+},Fe^{3+})_1\ {}^{X}(R^{2+})_{-1}{}^{Z}Si_{-1}]$. (۲) جانشینی همراه با پیوستن Na به جایگاه X که برای گارنت‌های دگرگونی ارتوگنیس‌ها معرفی شده‌است: $[Na^{+}{}_1(Y,REE)^{3+}{}_1(R^{2+})_{-2}]$، (۳) جانشینی Menzerite-(Y) که تنها در گارنت‌های دگرگونی گرانولیت‌های فلسی گزارش شده‌است: $[^{X}(Y,REE)^{3+}{}_1{}^{Y}R^{2+}{}_1\ \ {}^{X}R^{2+}{}_{-1}{}^{Y}(Al,Fe)^{3+}{}_{-1}]$ و (۴) جایگزینی هم ظرفیتی در گارنت توده‌های گرانیتی که ممکن است بخشی از همان روند جایگزینی Menzerite-(Y) باشد: $[(Y,REE)^{3+}{}_1Al^{3+}{}_{-1}]$

ترکیب کانی شناسی گارنت‌های مناطق مورد بررسی در این پژوهش از نوع آلماندین‌های غنی از منیزیم و منگنز هستند که بیشینه سازای اوگراندیتی (با بیشترین درصد گروسولار) در نمونه‌های مناطق تنبور (۱۳٫۵۱ درصد) و زمان‌آباد (۱۴٫۴۷ تا ۱۹٫۳۰ درصد) دیده می‌شود. این نوع کانی‌ها ویژه مناطق دگرگونی فشار متوسط تا بالا هستند. در شکل ۹، مشخص است که مقدار غنی‌شدگی REEها به ویژه HREEها رابطه مستقیمی با نسبت قطب‌های نهایی و نسبت اوگراندیت به پیرالسپیت ترکیب کانی شناسی دارد. با توجه به نوع تغییرات عناصر کمیاب نسبت به اکسیدهای اصلی و مقدار ناچیز Na_2O در نمونه‌ها (۰٫۰۲ تا ۰٫۰۷ درصد وزنی)، جانشینی همراه سدیم (جانشینی شماره ۲) نمی‌تواند در تمرکز این عناصر در گارنت‌های این پژوهش نقش داشته باشد. همچنین از آنجا که جانشینی Menzerite-(Y) برای گارنت‌های با بیش از ۲٫۷ درصد ایتریوم معرفی شده‌است [۳۶]، به نظر می‌رسد که جانشینی YAG [۳۷] با توجه به عملکرد معکوس آلومینیم و سیلیس، مناسب ترین سازوکار جایگزینی عناصر خاکی نادر در گارنت‌هاست. با توجه به این رابطه و نزدیکی شعاع یونی منگنز (۰٫۹۸۵۲ Å) با ایتریوم (۰٫۹۹۴۵ Å) و عناصر خاکی نادر سنگین [۳۴]، بیشترین تمرکز Y+HREE در نمونه‌های ده‌سلم با بیشترین مقدار MnO و کمترین آن در میشدوان و تنبور است. در مجموعه دگرگونی ده سلم، شدت دگرگونی از غرب به شرق ده سلم بیشتر می‌شود و گارنت‌های بخش غربی مجموعه، وابسته به رخساره شیست سبز و آغاز پهنه گارنت هستند [۲۱، ۲۲]. از آنجا که گارنت‌های اولیه وابسته به دگرگونی‌های درجه پایین تر از منگنز غنی ترند [۲۱]، نمونه‌های این منطقه از مجموعه ده سلم به شدت از Y+HREE غنی شده اند. این دیدگاه با مشاهده کمترین مقدار Zr در گارنت‌های ده سلم تایید می‌شود (شکل ۱۰)، زیرا کمترین مقدار این عنصر نیز در گارنت‌های سنگ‌های رسی دگرگونه درجه پایین گزارش شده است [۳۵]. تمرکز ایتریوم در اسپسارتیت‌ها و گارنت‌های غنی از سازنده آن باعث شده است که در برخی مناطق جهان، مقدار Y به بیش از ۲ درصد وزنی نیز برسد [۷، ۳۶]. از آنجا که شعاع یونی LREEها به Ca^{2+} نزدیک تر است، گارنت‌های غنی از کلسیم مانند تنبور با سنگ مادر رسی- مارنی و زمان‌آباد در مقایسه با انواع فقیر از کلسیم از LREEها غنی‌ترند [۳۳]، اما در گارنت‌های میشدوان که کمتر از ۱٪ CaO دارند، بیشترین مقدار LREEها دیده می‌شود.

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-03-16]
[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.2.9.1]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.2.383]



شکل ۱۰ تغییرات عناصر U، Th، Zr، Rb، Sr و Ba نسبت به LREE.

الگوی معمول عناصر خاکی نادر عادی بهنجار شده به کندریت برای اغلب گارنت‌های غنی از آلومینیوم دگرگونی (و ماگمایی)، بیانگر غنی‌شدگی شدید HREEها به LREEهاست. همچنین بخش LREE آنها اغلب زیر عدد یک نمودار قرار دارد و به ندرت تا چند برابر کندریت غنی‌شدگی نشان می‌دهند [۳۸]. در شکل ۸، همه نمونه‌ها نسبت به کندریت بیش از ۱۰ برابر غنی‌شدگی نشان می‌دهند. دلیل غنی‌شدگی همه عناصر را می‌توان به غنی بودن سنگ مادر از این عناصر نسبت داد. رسوب‌های رسی سرشار از کانی‌های رسی اغلب شامل مقدار زیادی REE هستند [۳] که طی فرایند دگرگونی، در فازهای مختلف جای می‌گیرند. افزون بر این، رسوب‌های رسی میشدوان بیشتر با توف‌ها و سنگ‌های آتشفشانی اسیدی همراه بوده که در اصل دارای غنی‌شدگی بیشتری از LREEها هستند. در مقابل، با حضور بین لایه‌ای ارتو آمفیبولیت‌های برآمده از سنگ‌های بازی (فرابازی) سرشار از کانی‌های مافیک با رسوب‌های رسی ده‌سلم و زمان آباد، می‌توان سنگ مادر این دو منطقه را غنی تر از HREE در نظر گرفت.

الگوی شناخته شده برای عناصر خاکی نادر گارنت‌ها در سه نمونه میشدوان، تنبور و زمان‌آباد ۲ وجود ندارد. به عبارتی، الگوی نمونه‌های ده‌سلم و زمان‌آباد ۱ شباهت بیشتری به الگوی معمول گارنت‌ها دارد اما در میشدوان و تنبور الگوی V شکل و در زمان‌آباد۲ الگویی صاف با تفکیک شدید LREEها نسبت به HREEها دیده می‌شود. داده‌های زمان‌آباد ۲ با وجود ابعاد بزرگ این شکفته بلورها که نشانه رشد در محیط‌های مساعد و سرشار از سیال است، به احتمال بسیار نشانگر مشکلات تجزیه و جدایش ناکامل میانبارها از گارنت به ویژه آپاتیت (با ۱/۶ درصد فسفر) است. چنان که پیشتر حضور بلورهای آپاتیت و کوارتز به صورت میانبار در بررسی‌های میکروسکوپی دیده شد (شکل‌های ۵ پ و ت). مقدار سیلیس این نمونه نیز بطور غیرعادی بالاست. هرچند REEها قادر به جایگیری در شبکه

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-03-16]
[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.2.9.1]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.2.383]

کوارتز نیستند، اما آپاتیت سرشار از LREEها می‌تواند الگوی عناصر خاکی نادر این نمونه‌ها را تغییر دهد.

غنی‌شدگی LREEها نسبت به HREEها در گارنت‌های بسیاری از مناطق ایران و جهان گزارش شده‌است [۱۲، ۳۳، ۳۹-۴۱] که بیشتر گارنت‌های از نوع آندرادیت- گرسولار (گراندیتی) اسکارن و دارای ناهنجاری مثبت Eu هستند [۳۵]. صرف نظر از ترکیب سنگ مادر، اغلب پژوهشگران عملکرد سیال‌های غنی از عناصر خاکی نادر را مهمترین عامل غنی‌شدگی LREEها نسبت به HREEها دانسته‌اند. حجم بالای سیال طی دگرگونی پیشرونده سنگ‌های رسوبی و واکنش‌های آبزدا به وجود می‌آید [۴۲]. افزایش فشار دگرگونی، حضور سیال‌ها (گرمابی) و حجم‌های بالای سیال همراه آنیون‌های پیچیده (کربنات، فسفات، و هالید) در سامانه‌های دگرگونی تحرک بیشتر LREEها نسبت به HREEها را در پی دارد [۱، ۳۸]. این فرایندها سبب می‌شود تا فراوانی REEها در سنگهای دگرگونی به طور قابل ملاحظه‌ای از سنگ مادر آنها متفاوت باشد و مقدار REEها به ویژه LREE ها در سنگ کاهش یابد. به عقیده لی و همکاران [۳۸] پس از دور شدن از شرایط اوج دگرگونی طی آبگیری و تشکیل فازهای کانیایی دگرگونی پسرونده، اگر فاز سیال غنی از LREEها باشد، این عناصر بین کانی‌ها باز توزیع می‌شوند. در این مرحله، نقش کانی در حال تعادل (و یا تبلور) و مقدار ضرایب تفکیک عناصر کانی به سیال اهمیت می‌یابد. از آنجا که عناصر خاکی نادر در شرایط اسیدی (pH پایین) و حضور آنیون‌های فراوان، تحرک بالایی دارند [۴۳]، الگوی با بیشترین غنی‌شدگی از LREEها در گارنت‌های مجموعه میشدوان را می‌توان به دگرنهادی فلئور و بور که باعث ایجاد تورمالین در سنگ‌ها شده‌اند و تبلور کانی اپیدوت در فازهای بعدی دگرگونی نیز نسبت داد. تورمالین‌ها به طور کلی با غلظت‌های متغیر و به نسبت بالای Y+REE و Sc مشخص می‌شوند [۴۴]. همچنین نسبت به گارنت در کلینوزوئیزیت، عناصر Nd و Sm از Yb سازگارترند بنابراین مداخله کلینوزوئیزیت در رشد گارنت می‌تواند REE های گارنت را دستخوش تغییر کند [۴۵، ۴۶]. حضور کانی زیرکن نیز عامل دیگری است که می‌تواند منجر به کاهش مقدار HREE ها از گارنت مجاور شود، زیرا Kd_{HREE} زیرکن‌ها بیشتر از گارنت است [۱]. رشد پس از زمین ساخت کانی تورمالین و تشکیل کانی‌های خانواده اپیدوت در سنگ‌های دگرگونی میشدوان (شکل ۶) می‌تواند شاهدی بر عملکرد سیال‌ها و اثر مستقیم بر تغییر الگوی REEها در گارنت‌های این منطقه باشد. گارنت‌های تنبور و میشدوان افزون بر داشتن بیشترین مقدار LREEها، بیشترین مقدار Ba ،Rb و Sr (فقط در میشدوان) را دارند (شکل‌های ۹ ج و ۱۰). اندازه یونی بزرگتر عناصر سنگ دوست بزرگ یون (LILE) نسبت به جایگاه با همارایی ۸ ساختار گارنت، بدین معنی است که گارنت‌ها در اصل از LILE تهی هستند. بنابراین افزایش این عناصر در گارنت‌های این دو منطقه را می‌توان به نقش بیشتر سیال‌ها در این مناطق نسبت داد.

ویژگی دیگر گارنت‌های مورد بررسی، ناهنجاری منفی Eu است. ناهنجاری منفی Eu می‌تواند چند دلیل باشد [۴۶]: (۱) رشد پلاژیوکلاز غنی از Eu طی یا پیش از رشد نهایی یا متعادل گارنت Eu را نسبت به سایر REE ها کاهش می‌دهد، (۲) Eu^{2+} نسبت به سایر REE ها کمتر دستخوش باز تفکیک بین گارنت و سیال شده و یا مقدار زیادی از مایع غنی از Eu^{2+} پیش از رشد نهایی گارنت از سامانه حذف می‌شود و (۳) کاهش اکسیژن طی دوره رشد نهایی گارنت نسبت Eu^{2+}/Eu^{3+} را در مایع همزیست بالاتر برده و اجازه ورود Eu به گارنت را می‌گیرد (Eu^{2+} در گارنت کمتر از Eu^{3+} سازگار است). ناهنجاری منفی Eu به همراه ناهنجاری مثبت Ce (جدول ۲) نشان دهنده گریزندگی پایین اکسیژن (fO_2) در محیط و سیال است. با کاهش fO_2 ، حلالیت U در سیال گرمابی کاهش می‌یابد و این امر می‌تواند ورود U را به گارنت افزایش دهد [۴۷]. در مقابل، افزایش fO_2 مایع باعث افزایش حلالیت U و کاهش ورود U به کانی می‌شود. این فرآیند برای توصیف تغییرات U در گارنت‌ها از ذخایر اسکارن Xeertala Fe-Zn در شمال چین مطرح

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-03-16]
[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.2.9.1]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.2.383]

شده‌است [۴۸]. همبستگی شدید بین فراوانی U و الگوهای LREEها (شکل ۱۰) نشان می‌دهد که همان فرآیندهای غنی کننده عناصر خاکی نادر سبک بر توزیع U در گارنت اثر گذاشته‌اند.

برداشت

گارنت‌های متبلور شده در فازهای مختلف دگرگونی ناحیه‌ای موثر بر مناطق ده‌سلم، زمان‌آباد، میشدوان و تنبور غنی‌شدگی به نسبت زیادی از عناصر کمیاب را نشان می‌دهند. مقدار این عناصر رابطه مستقیم و خوبی با درصد MnO و Al_2O_3 آلماندین دارند به طوری که بیشترین تمرکز عناصر کمیاب (۵۵۲ ppm) و Y (۱۱۲۲ ppm) در گارنت‌های ده‌سلم دیده می‌شود. جانشینی از نوع YAG در گارنت‌های غنی از اسپسارتیت مناسب‌ترین گزینه برای توجیه جانشینی با کاتیون‌های میزبان در همارایی ۸ به نظر می‌رسد. به دلیل غنی بودن رسوب‌های رسی سنگ مادر، REEهای همه نمونه‌ها نسبت به کندریت غنی شده‌اند. بر عکس غنی‌شدگی بالای HREEها به LREEها که در گارنت‌های ده‌سلم و زمان‌آباد، گارنت‌های میشدوان و تنبور غنی‌شدگی بیشتر LREEها نسبت به HREEها را نشان می‌دهند که با الگوی شناخته شده برای گارنت‌ها متفاوت است. سیال‌های سرشار از LREEها و آنیون‌های پیچیده هالید و فسفات می‌توانند عامل این غنی‌شدگی باشند. بی نظمی‌هایی که کم و بیش در توزیع عناصر کمیاب در برخی نمونه‌ها دیده می‌شود، افزون بر مشکلات فنی در خالص سازی نمونه‌ها، می‌تواند مربوط به نقش تبلور کانی‌های همبر، کانی‌های فرعی میانبار و تجزیه‌ای ناشی از دگرگونی قهقرایی و مقدار ضرایب تفکیک عناصر کمیاب آنها نسبت به گارنت باشد. ناهنجاری منفی Eu و مثبت Ce و غنی‌شدگی بیشتر گارنت‌های میشدوان و تنبور از LILEها نسبت به ده‌سلم و زمان‌آباد می‌توانند شاهدی برنقش مهم سیال‌ها و گریزندگی کم اکسیژن باشند.

مراجع

[1] Xiaa Q.X., Zhou L.G., *"Different origins of garnet in high pressure to ultrahigh pressure metamorphic rocks",* Journal of Asian Earth Sciences 145 (2017) 130–148.

[2] Voncken J., *"The Rare Earth Elements an Introduction",* SpringerBriefs in Earth Sciences (2016) 137 PP.

[3] Sarapää O, Ani T. A., Lahti S. I., Lauri L. S., Sarala P., Torppa A., Kontinen A., *"Rare earth exploration potential in Finland",* Journal of Geochemical Exploration 133 (2013) 25–41.

[4] Lesnov F. P., *"Consistent patterns of rare earth element distribution in accessory minerals from rocks of mafic-ultramafic complexes"*, Open Geosciences Central European Journal of Geosciences 5 1 (2013) 112-173.

[5] Gatewood M. P., Dragovic B., Stowell H. H., Baxter E. F., Hirsch D. M., Bloom R., *"Evaluating chemical equilibrium in metamorphic rocks using major element and Sm–Nd isotopic age zoning in garnet, Townshend Dam, Vermont, USA",* Chemical Geology 401 (2015) 151–168.

[6] Sun C., Liang Y., *"A REE-in-garnet–clinopyroxene thermobarometer for eclogites, granulites and garnet peridotite s "*, Chemical Geology 393–394 (2015) 79–92.

[7] Marsh J.H., Grew E.S., Gerbi Ch.C., Yates M.G., Culshaw N.G., *"The petrogenesis of the garnet menzerite-(Y) in granulite facies rocks of the Parry Sound Domain, Grenville Province, Ontario",* Canadian Mineralogist 50 (2012) 73–99.

[8] Hönig S., Čopjaková R., Škoda R., Novák M., Dolejš D., Leichmann J., Galiová M. V., *"Garnet as a major carrier of the Y and REE in the granitic rocks: An example from the layered anorogenic granite in the Brno Batholith",* Czech Republic American Mineralogist, 99, (2014) 1922–1941.

[9] Mokhtari M.A.A., Emami M.H., *"REE pattern and REE mineralization in apatite- magnetite deposits of Bafq- Saghand district (central Iran)",* Geosciences, Scientific Quarterly Journal, Special Issue 17 1 (2008) 162-169.

[10] Tajbakhsh G., Emami M.H., Moine Vaziri H., Rashidnejad Omran N., *"Petrography, geochemistry and emplacement mechanism of Hashtsar ring complex (in Persian)"*, Geosciences 73 (2009) 123-132.

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-03-16]

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.2.9.1]

[DOI: 10.29252/ijcm.28.2.383]

[11] Tajbakhsh G., Emami M.H., Moine Vaziri H., Rashidnejad Omran N., *"Petrology, Geochemistry and Tectonomagmatic Settinng of Kaleybar Intrusion (Eastern Azarbaijan) (in Persian)"*, Geosciences 22 85 (2012) 205-224.

[12] Zahedi A., Boomeri M., Mackizadeh M.A., *"REE geochemistry in skarn garnets from Khut and Panah-Kuh Ore feposit, West of Yazd (in Persian)",* Petrology 4 13 (2013) 47-66.

[13] Abedini A., Calagari A.A., Hadjalilu B., *"Geological - mineralogical characteristics and trace-elements geochemistry in Aghadjari bauxite deposit, south of Shahindezh, NW of Iran (in Persian)",* Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 16 2 (2008) 346-356.

[14] Samani B., *"Metallogeny of the Precambrian in Iran",* Precambrian Research, 39, (1988) 85-106.

[15] Ehya F., *"Geochemistry of rare earth elements in fluorite from the Bozijan (Chekap) deposit, Markazi Province (in Persian)",* Journal of Advanced Applied Geology 1 2 (2011) 113-125.

[16] Shahraz S., Kohsary A.H., *"study of Trace and Rare Earth Elements in coal Basins of Iran (in Persian)",* Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 22 (4) (2015) 685-696.

[17] Ghalehnoee M.H., Kohsary A. H., *"The study of distribution of monazite and REE in the Marvast alluvium Yazd Iran in Persian)",* Iranian journal of crystallography and mineralogy, 22 4 (2015) 621-630.

[18] Droop G.T.R., *"A general equation for estimating Fe^{3+} concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria",* Mineralogical Magazine 51 4 (1987) 431-435.

[19] Aghanabati A., *"Geology of Iran (in Persian)",* Geological Survey of Iran, Tehran, (2004) 606 pp.

[20] Masoudi F., Mehrabi B., Mahmoudi S., *"Garnet (almandines-pessartine) growth zoning and its application to constrain metamorphic history in Deh Salm Complex, Iran",* Journal of Scienes Islamic Republic of Iran 17 3 (2006) 235-244.

[21] Bahramnejad A., Bagheri S., Ahmadi A., Zahedi A., *"Progressive metamorphism in metapelites of the Deh-Salm metamorphic complex, east of the Lut block according to garnet-biotite thermometry (in Persian)",* Scientific Quarterly journal, Geosciences 26 102 (2017) 325-338.

[22] Mahmoudi S., Masoudi F., Corfu F., Mehrabi B., *"Magmatic and metamorphic history of the Deh-Salm metamorphic Complex, Eastern Lut block, (Eastern Iran), from U–Pb geochronology"* International Journal of Earth Sciences 99 (2010) 1153–1165.

[23] Ramezani J., Tucker R., *"The Saghand region, Central Iran: U–Pb geochronology, petrogenesis and implication for Gondwana tectonics",* American Journal of Science 303 (2003) 622–665.

[24] Moazzen M., *"Study of the Kuh-e-Tanbour metamorphic complex with special reference to the garnet-rich layers",* Kerman University, Iran, M.Sc. thesis (1993) 162 p.

[25] Moradian A., peighambari K., Ahmadipour H., *"Petrography, mineral chemistry and petrogenesis of metapelites of the Tanbobuar metamorphic complex, east of Sirjan (Kerman province) (in Persian)",* Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 13 2 (2013) 347-362.

[26] Javadi Bani A., *"Study of clay and semi-clay metamorphic rocks in Mount Tabor, southeast of Sanandaj-Sirjan (in Persian)",* Tabriz University, Iran, M.Sc. thesis, (2014).

[27] Gourabjiri-pour A.; Hoshmandzadeh, A.R.; KHosro-Tehrani Kh., Emami M.H., *"Protolits of Boneh-Shorou Amphibolites in Gelmandeh massive (Saghand-Central Iran) (in Persian)",* Journal of Environmental Geology 3 4 (2009) 7-24.

[28] Peighambari S., Jamshidi Badr M., Heidarian H., *"The Petrofabric and geochemistry of garnet porphyroblast in Khajoo and tanbor metamorphic complexes (East Sirjan) (in Persian)",* 6th National Geological Conference of Payame noor University (2012).

[29] Moazzen M., *"Investigation of the formation of coarse and dense minerals in the shear zone based on geochemical and petrofabric evidence,*

[DOI: 10.29252/ijcm.28.2.383] [DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.2.9.1] [Downloaded from ijcm.ir on 2025-03-16]

an example of South Iran's metamorphic belt", 3Th symposium of Crystallography and Mineralogy of Iran, (1994).

[30] Safei K., *"Mineralogy of metamorphic rocks of the Tonbour complex in north east of Sirjan", 30th* Symposium of Geosciences, (2012).

[31] Moazzen M., *"Chlorite-chloritoid-garnet equilibria and geothermometry in the Sanandaj-Sirjan metamorphic belt, southern Iran",* Iranian Journal of Science & Technology, Transaction A, 28 A1 (2004).

[32] Sun S.S., McDonough W.F., *"Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes",* in: Saunders AD, Norry MJ (Eds) Magmatism in the ocean basins, Geological Society London Special Publication 42 (1989) 313-345.

[33] Peng H.j., Zhang C.Q., Mao J.W., Santosh, M., Zhou Y.M., Hou L., *"Garnets in porphyry–skarn systems: A LA–ICP–MS, fluid inclusion, and stable isotope study of garnets from the Hongniu–Hongshan copper deposit, Zhongdian area, NW Yunnan Province",* China Journal of Asian Earth Sciences 103 (2015) 229–251.

[34] Gaspar M., Knaak C., Meinert L. D., Moretti R*., "REE in skarn systems: A LA-ICP-MS study of garnets from the Crown Jewel gold deposit",* Geochimica ET Cosmochimica Acta 72 (2008)185-205.

[35] Bea F., Montero P., Garuti G., Zacharini F., *"Pressure dependence of rare earth element distribution in amphibolite and granulite-grade garnets. A LA-ICP-MS study",* Geostandards News letter, 21 (1997) 253–270.

[36] Grew E.S., Marsh J.H., Yates M.G., Lazic B., Armbruster T., Locock A., Bell S.W., Dyar M.D., Bernhardt H.J., Medenbach O., *"Menzerite-(Y), a new species, $\{(Y, REE)\ (Ca, Fe^{2+})_2\}[(Mg, Fe^{2+})(Fe^{3+}, Al)](Si)_3O_{12})$, from a felsic granulite, Parry Sound, Ontario, and a new garnet end-member, $\{Y_2Ca\}[Mg_2](Si_3)O_{12}$",* The Canadian Mineralogist 48 (2010) 1171–1193.

[37] Jaffe H.W., *"The role of yttrium and other minor elements in the garnet group",* American Mineralogist 36 (1951) 133–155.

[38] Li J., Du J., Chang Q., Liu L., Cui Y., Xie C., Sun U.Y*., "REE concentrations of garnet and omphacite in eclogites from the Dabie Mountain, central China",* Chinese Journal of Geochemistry 32 (2013) 085–094 85–94

[39] Moor F., Deymar S., Taghipour B., *"Geochemistry of Rare Earth Elements and mineral chemistry of garnet in Darreh Zerreshk skarns (southwest of Yazd)",* Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 21, 3 (2013) 431-444.

[40] Park C., Song Y., Kang I.M., Shim J., Chung D., Park C.S., *"Metasomatic changes during periodic fluid flux recorded in grandite garnet from the Weondong W-skarn deposit, South Korea",* Chemical Geology 451 (2017) 135–153.7.

[41] Sepidbar F., Mirnejad H., Li J.W., Wei C., Georgee L.L., Burlinson K., *"Mineral geochemistry of the Sangan skarn deposit, NE Iran: Implication for the evolution of hydrothermal fluid",* Chemie der Erde 77 (2017) 399–419.

[42] Li Y., Du J., *"Thermodynamic calculation on the phase transformation and water release of subducted sediment from 10 to 35 kbar*", Journal of Physics and Chemistry of Solids 71 (2010) 1077−1083.

[43] Lottermoser B.G., *"Rare earth elements and hydrothermal ore formation processes",* Ore Geol. Rev. 7 (1992) 25–41.

[44] Čopjaková R., Škoda R., Vašinová Galiová M., Novák M*., "Distributions of Y+REE and Sc in tourmaline and their implications for the melt evolution; examples from NYF pegmatites of the Třebíč Pluton, Moldanubian Zone",* Czech Republic Journal of Geosciences 58 (2013), 113–131.

[45] Gulbin Y. L., *"Zonal REE+Y Profiles in Garnet and Their Genetic Implications: A Case Study of Metapelites from the Northern Ladoga Region",* Geology of Ore Deposits Vol. 58 No. 7 (2016) 559-567.

[46] Hickmott D. D., Spear F. S., *"Major-and trace-element zoning in garnets from calcareous pelites in the NW Shelburne Falls Quadrangle, Massachusetts: garnet growth histories in*

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-03-16]
[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.2.9.1]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.2.383]

retrograded rocks", Journal of Petrology 33 (1992) 965-1005.

[47] Smith M.P., Henderson P., Jeffries T.E.R., Long J., Williams C.T., *"The rare earth elements and uranium in garnets from the Beinn an Dubhaich Aureole,Skye, Scotland, UK: constraints on processes in a dynamic hydrothermal system",* Journal of Petrology 45 (2004) 457-484.

[48] Zhai D.G., Liu J.J., Zhang H.Y., Wang J.P., Su, L., Yang, X.A., Wu, S.H., *"Origin of oscillatory zoned garnets from the Xieertala Fe-Zn skarn deposit, northern China: in situ LA-ICP-MS evidence",* Lithos 190 (2014) 279–291.

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-03-16]

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.2.9.1]

[DOI: 10.29252/ijcm.28.2.383]